

声道轮廓 CSV 提取方法

基于 3D Slicer 的实现

2025 年 5 月 9 日

摘要

本文档总结了从 3D Slicer 中提取声道轮廓并转换为 VTL3D/Acoustic3dSimulation 所需 CSV 格式的方法。主要包括 n 个截面（2 个端点和 $n-2$ 个中心线点）的切割、局部坐标系建立、轮廓点处理及规范化 CSV 输出等关键步骤。特别关注了轮廓方向、法线计算和坐标转换中的技术细节，以确保数据连贯性与正确性。

1 背景

声学研究，声道三维模型的二维截面数据对声学仿真具有重要意义。本文介绍的方法从 3D Slicer 环境中导出的封闭腔体模型出发，按照特定格式提取截面轮廓信息，以便于后续声学模拟软件使用。

1.1 CSV 文件规范

根据 `Acoustic3dSimulation::extractContoursFromCsvFile` 函数的需求，CSV 文件格式定义如下：

- 文件由成对的行组成，每对行代表一个声道横截面。
- 奇数行：包含全局 X 坐标和局部 Y 坐标相关数据：
 1. 中心点全局 X 坐标 (double)
 2. 法线全局 X 分量 (double)
 3. 起始端缩放因子 (double)
 4. 轮廓点局部 Y 坐标序列 (double...)
- 偶数行：包含全局 Y 坐标和局部 Z 坐标相关数据：
 1. 中心点全局 Y 坐标 (double)
 2. 法线全局 Y 分量 (double)

3. 末端缩放因子 (double)
 4. 轮廓点局部 Z 坐标序列 (double...)
- 字段分隔符为分号 (;)

2 方法概述

整个提取过程可分为以下几个主要步骤:

1. 组合端点与中心线, 得到 n 个采样点
2. 计算每个采样点的切向量 (法线方向)
3. 设置 vtkCutter 对每个点进行切片
4. 建立局部坐标系并计算轮廓点局部坐标
5. 按极角排序轮廓点
6. 按规定格式写入 CSV

3 实现细节

3.1 中心线采样与切向量

首先从两个端点 (Endpoints) 和中心线曲线 (Centerline curve) 读取控制点, 组合为完整的采样点序列:

$$\text{pts} = [P_{\text{start}}, \text{curve_pts}, P_{\text{end}}] \quad (1)$$

对每个采样点, 使用三点滑动平均计算切向量 \vec{t} :

$$\vec{v}_i = \begin{cases} \vec{p}_{i+1} - \vec{p}_i, & i = 0 \\ \frac{\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_{i-1}}{2}, & 0 < i < n - 1 \\ \vec{p}_i - \vec{p}_{i-1}, & i = n - 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\vec{t}_i = \begin{cases} \vec{t}_1, & i = 0 \\ \frac{\vec{v}_{i-1} + \vec{v}_i + \vec{v}_{i+1}}{3}, & 0 < i < n - 1 \\ \vec{t}_{n-2}, & i = n - 1 \end{cases} \quad (3)$$

然后对每个 \vec{t}_i 进行归一化, 得到单位切向量, 用作截面法线。

3.2 局部坐标系建立

对每个采样点构建局部坐标系 $(\vec{n}, \vec{t}, \vec{b})$ ，其中：

- \vec{n} 为截面法线（即切向量）
- \vec{t} 为截面内的”局部 Y 轴”
- \vec{b} 为截面内的”局部 Z 轴”

计算方法如下：

$$\vec{n} = \text{normalize}(\vec{t}_i) \quad (4)$$

$$\vec{r} = \begin{cases} (0, 0, 1), & \text{if } |n_z| < 0.9 \\ (0, 1, 0), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$\vec{t}_{\text{tmp}} = \vec{n} \times \vec{r} \quad (6)$$

$$\vec{t} = \text{normalize}(\vec{t}_{\text{tmp}} \cdot [1, -1, 1]) \quad (7)$$

$$\vec{b} = \vec{n} \times \vec{t} \quad (8)$$

其中， \vec{t} 计算中的乘法 $[1, -1, 1]$ 用于翻转 Y 分量，确保法线在 CSV 中的正确表示。

3.3 轮廓点提取与排序

使用 vtkCutter 和平面方程提取每个采样点的轮廓点：

$$\text{plane}(\vec{x}) = \vec{n} \cdot (\vec{x} - \vec{p}) = 0 \quad (9)$$

对每个轮廓点计算局部坐标：

$$\text{local_y} = (\vec{pts} - \vec{p}) \cdot \vec{t} \quad (10)$$

$$\text{local_z} = (\vec{pts} - \vec{p}) \cdot \vec{b} \quad (11)$$

为保证轮廓点顺序一致，根据极角排序：

$$\theta_i = \arctan 2(\text{local_z}_i, \text{local_y}_i) \quad (12)$$

$$\text{sort_idx} = \text{argsort}(\theta_i) \quad (13)$$

可通过 clockwiseContour 参数选择顺时针或逆时针排序。

3.4 CSV 格式输出

将处理后的数据按规定格式写入 CSV:

- 奇数行: $[P_x, t_x, \text{scale}, \text{local_y}_0, \text{local_y}_1, \dots]$
- 偶数行: $[P_y, t_y, \text{scale}, \text{local_z}_0, \text{local_z}_1, \dots]$

其中, t_x 和 t_y 分别是局部 Y 轴 \vec{t} 的 X 和 Y 分量, 表示截面内的参考方向。

4 关键技术点

4.1 法线方向修正

最初遇到的主要问题是截面的”法线”方向在 CSV 中的表示:

- CSV 中的”法线”实际指的是截面平面内的一个基向量 (而非法向量)
- 需要确保这个基向量的 Y 分量符号一致

最终通过在 `compute_reference_axes` 函数中对叉积结果的 Y 分量取反解决:

$$\vec{t} = \text{normalize}(\vec{n} \times \vec{r} \cdot [1, -1, 1]) \quad (14)$$

4.2 轮廓点排序

轮廓点必须按顺时针或逆时针排序。通过计算轮廓点在局部坐标系中的极角, 再用 `argsort` 处理:

$$\theta_i = \arctan 2(\text{local_z}_i, \text{local_y}_i) \quad (15)$$

这确保了轮廓点在每个截面内的一致性, 便于后续渲染和分析。

4.3 缩放处理

脚本支持多种缩放策略:

- 可选将坐标单位从 mm 转换为 cm
- 可选使用等效半径归一化轮廓点坐标
- 控制是否基于截面面积计算缩放因子

5 使用说明

在 3D Slicer Python Console 中执行：

```
>>> exec(open('/path/to/slicer_extract_contour_csv.py').read())
```

关键可调参数包括：

- fiducialName, curveName, modelName: 数据节点名称
- outputDir, csvName: 输出位置
- clockwiseContour: 轮廓点排序方向
- use_cm_unit: 单位转换
- scale_by_radius: 缩放策略

6 总结

本文档描述的方法实现了从 3D Slicer 模型到 VTL3D/Acoustic3dSimulation 所需 CSV 格式的准确转换。通过精心设计的局部坐标系建立、轮廓点排序和法线方向处理，解决了坐标转换和数据连贯性的难点。所得 CSV 文件可被下游声学仿真工具直接使用，为声道声学特性研究提供了基础数据。